

Design of Quadruped Robot Torso Structure Based on Stress Analysis of Cross-Sections

Mohammad Ibrahim * 

Dr. Essa Alghannam **

Dr. Mohamad Khnissi ***

(Received 7 / 4 / 2026. Accepted 12 / 7 / 2026)

□ ABSTRACT □

This research presents a structural design study of the torso frame of a quadruped robot, focusing on identifying the optimal shapes and dimensions of link rod cross-sections under tensile, compressive, bending, and torsional stresses. The objective is to achieve the minimum possible torso weight while maximizing payload capacity and thereby enhancing energy efficiency, using PLA material for 3D printing. The assumptions include analyzing individual cross-sections (circular, square, rectangular) without lateral supports. Finite Element Analysis (FEA) was conducted using SolidWorks software to simulate stress conditions, incorporating the effect of hollowing to reduce weight while increasing structural stiffness. The results indicate that circular sections are more susceptible to deformation under tensile and compressive loads, whereas rectangular sections (Position 1) perform better under bending, and circular sections demonstrate good resistance to tensile stress. The hollowing effect improves stress distribution without increasing material volume. The torso design was validated under a 400-gram load, showing good performance with cross-bracing supports. Even after being hollowed out using the cavitation effect, a material saving of 1/8 of the cross-link size was achieved. This research contributes to the development of cost-effective quadruped robots for industrial and educational applications.

Keywords: Quadruped robot, Torso design, Stress analysis, Finite element analysis, PLA material.

Copyright  :Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Master's Student, Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.

Email: mohamad.ibrahim@latakia-univ.edu.sy

** Assistant Professor, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.

Email: essaalghannam@latakia-univ.edu.sy

*** Professor, Mechatronics Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.

Email: dr.mohamadkhnese@latakia-univ.edu.sy

تصميم هيكل جذع روبوت رباعي الأرجل بناءً على تحليل إجهاد المقاطع العرضية

محمد إبراهيم *

د. عيسى الغنام **

د. محمد خنيسي ***

(تاريخ الإيداع 7 / 4 / 2026. قُبِلَ للنشر في 12 / 7 / 2026)

□ ملخص □

يقدم هذا البحث دراسة تصميمية لهيكل جذع روبوت رباعي الأرجل، مع التركيز على تحديد أشكال وأبعاد المقاطع المثالية لقضبان الوصلة تحت إجهادات الشد، الضغط، الانحناء، والالتواء. الهدف هو تحقيق أقل وزن ممكن لهيكل الجذع مع زيادة سعة الحمولة وبالتالي زيادة كفاءة الطاقة، باستخدام مادة PLA للطباعة ثلاثية الأبعاد. الافتراضات تشمل دراسة المقاطع الفردية (دائرية، مربعة، مستطيلة) دون دعائم جانبية، تم استخدام تحليل العناصر المحدودة (Finite Element Analysis – FEA) في برنامج SolidWorks لمحاكاة الإجهادات، مع دمج تأثير التجويف لتقليل الوزن مع زيادة صلابة الشكل. النتائج تشير إلى أن المقاطع الدائرية أكثر عرضة للتشوه تحت الشد والضغط، بينما المقاطع المستطيلة (التموضع 1) أفضل أداءً تحت الانحناء، والمقاطع الدائرية تظهر مقاومة جيدة لإجهادات الشد. يحسن تأثير التجويف توزيع الإجهاد دون زيادة حجم المادة. تم التحقق من تصميم الجذع تحت حمولة 400 غرام، مما يظهر أداءً جيداً مع دعائم متصالبة حتى بعد تفريغها باستخدام تأثير التجويف مما حقق توفيراً في حجم المادة المستخدمة مقداره 1/8 من حجم الوصلة المتصالبة. يساهم هذا البحث في تصميم روبوتات رباعية الأرجل مقبولة التكلفة للتطبيقات الصناعية والتعليمية.

الكلمات المفتاحية: روبوت رباعي الأرجل، تصميم الهيكل، تحليل إجهادات، تحليل عناصر منتهية، مادة PLA.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر



بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالب ماجستير، قسم هندسة الميكاترونك، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

إيميل: mohamad.ibrahim@latakia-univ.edu.sy

** مدرس، قسم هندسة الميكاترونك، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

إيميل: essaalghannam@latakia-univ.edu.sy

*** أستاذ، قسم الميكاترونك، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)، اللاذقية، سورية.

إيميل: dr.mohamadkhnese@latakia-univ.edu.sy

1- مقدمة:

مع تزايد الاعتماد على الروبوتات في التطبيقات الصناعية والتعليمية، أصبحت الروبوتات ذات الأرجل محط اهتمام كبير مقارنة مع الروبوتات ذات العجلات بفضل قدرتها على التنقل في بيئات ذات طابع غير واضح كالأراضي الرملية والترابية وتنفيذ مهام متنوعة مثل النقل والاستكشاف وصعود السلالم وقدرتها على تجاوز العوائق المختلفة [1]، تبعاً لعدد الأرجل في الروبوتات ذات الأرجل يمكن أن يتم تصنيفها إلى روبوتات ثنائية الأرجل [2] وروبوتات رباعية الأرجل [3] وذات عدد أرجل تفوق الأربعة [4] ويمكن تقسيم الروبوتات ذات الأرجل الأربعة إلى فئات اعتماداً على المشغل الذي تعتمد عليه : هيدروليكية، كهربائية، بنيوماتيكية [5] المشغلات الكهربائية تقدم دقة تحكم أعلى ولكن قدرة تحميل محدودة أما البنيوماتيكية تعاني ضعف في المميزات الخطية مما يجعلها بطبيعتها صعبة التحكم [6]، التحدي الأساسي في عالم روبوتات ذات الأرجل هو الخوارزمية المستخدمة في التحكم بالروبوت نفسه والتي تنعكس على البنية الميكانيكية [7]، [8]. بالمقارنة مع الروبوتات المقادة بالمحركات الكهربائية فإن الروبوتات المقادة بمحركات هيدروليكية تقدم نسباً أعلى من طاقة/كتلة مما يمكن الروبوت من التعامل مع أحمال أثقل وقدرة تحمل أعلى وإنتاجية أفضل [9] بسبب عدم حاجتها للشحن وكان هناك محاولات لتقليص حجم المركبات رباعية الأرجل التي تعتمد مشغلاً هيدروليكياً [10] ولكن لم يتم تبني المشغلات الهيدروليكية بشكل كبير في الروبوتات رباعية الأرجل نظراً لكلفة التعقيد في التركيب والصيانة، في [11] و [12] تظهر الروبوتات مناورة ممتازة مقارنة بالروبوتات المشغلة هيدروليكياً وحتى القدرة على المشي في البيئات مختلفة التضاريس اعتماداً على تغذية راجعة مشابهة للأنظمة الحسية عند الكائنات الحية. إن عملية تصميم الروبوتات ذات الأرجل عملية معقدة مما يجعل تحسين بنيتها تحدياً حقيقياً على سبيل المثال استخدم [13] خوارزمية أمثلة لتصميم روبوت متعدد الأرجل مؤلف من وصلات صلبة مكونة للهيكل. ويزيد الأمر تعقيداً ارتفاع التكاليف بسبب الحاجة إلى مواد أقوى وتصميمات معقدة إذ بدون تحليل إجهاد دقيق قد يتطلب الجذع مواد أعلى تكلفة أو هياكل إضافية لتعزيز الصلابة مما يرفع التكلفة ويزيد استهلاك الطاقة بسبب الوزن الزائد إذ يزيد الجذع الثقيل من عبء المحركات بالتالي يقلل من عمر البطارية خاصة في الروبوتات ذات الحركة المستمرة في البيئات الصناعية، يتعرض هيكل الجذع بشكل خاص لتحديات كبيرة تتعلق بتحقيق التوازن بين الوزن المنخفض للهيكل والقوة الهيكلية التي يضيفها ووزن الحمولة التي يمكن أن ينقلها حيث تقلل الوزن فقط ممكن أن يؤدي إلى أخطاء غير مرغوبة كالاhtزازات التي تؤدي لاضطراب في نظام التحكم [14] وبالتالي كفاءة الطاقة المستهلكة إذ يجب الحفاظ على توازن بين تخفيض وزن الهيكل والصلابة الهيكلية. التضاريس المركبة والتنقل في بيئات غير مستوية يزيد الإجهاد على هيكل الجذع أيضاً ويؤدي لظهور توزيع إجهادات غير متوازنة على الهيكل أثناء الحركة مثل الشد والضغط مما يؤدي إلى تشوهات محتملة في الجوانب الضعيفة غير المدعمة وخاصة التي تدعم الحمولة الإضافية مما قد يؤدي إلى انهيار أو فشل هيكلي أثناء التشغيل يهدد السلامة في التطبيقات الصناعية أو الإنقاذ وهذا يزيد الحاجة للوصول إلى هيكل محسن يزيد الاستقرار وإلا أدى إلى تلف سريع في الهياكل وخاصة غير المرنة منها، حالياً تعتبر النمذجة جزء أساسي في عملية التصنيع للحصول على التصميم أمثل، أكثر فعالية، أرخص، أقل وزناً وأسهل للإنتاج. تحليل العناصر المنتهية هو أحد أهم الأدوات لتحليل التصميم حالياً حيث يقوم بتقسيم الهيكل الكبير ذو التعقيد الفيزيائي الكبير إلى أشكال أصغر أكثر قدرة على التعامل وله خصائص المادة الموجود في نطاقها بالتالي المحاكى يستطيع أن يفهم كيف يمكن أن تستجيب البنية الكبيرة لقوى خارجية أو داخلية. من الواجب إنشاء تصميم آخذين بعين الاعتبار

القوى الميكانيكية والأحمال التي يتعرض لها في أسوأ حالة للروبوت لمنع الانهيار الهيكلي، العديد من المواد البوليميرية مثل PLA، ABS، النايلون وألياف الكربون هي أساسية لعملية النمذجة بالمواد المنصهرة Fused Deposition Modeling (FDM) [15]، [16] على الرغم من توفر مواد مثل PLA الرخيصة والمناسبة للطباعة ثلاثية الأبعاد لكنها ضعيفة نسبياً تحت الإجهادات المتكررة مما يتطلب تحسيناً في التصميم لضمان إعادة توزيع الإجهادات دون فقدان القوة. وتبحث دراسة [17] في كيفية إدخال بيانات اختبار الشد الحقيقية لمادة PLA بكثافات ملء مختلفة (Infill Densities) من 20% إلى 100% (إلى برنامج Ansys لعمل محاكاة مرنة غير خطية دقيقة ومقارنتها بالنتائج المخبرية و تستعرض ورقة [18] تجارب محاكاة عبر إصدار Ansys Workbench R2 لتوضيح كيف يؤثر دمج منحنى الإجهاد والانفعال الحقيقي بدقة على موثوقية نتائج المحاكاة الحاسوبية (FEA Simulation)

2- أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في مساهمته في تعزيز تطوير الروبوتات رباعية الأرجل وتحسين التكيف البيئي والمرونة لهذا النوع من الروبوتات من خلال الهياكل التي تتحمل الصدمات، وتبدي تحسن في الأداء الميكانيكي والاستقرار، وتساهم في تحقيق الاستدامة من خلال تقليل المواد بالتالي تقليل الوزن وزيادة كفاءة الطاقة، مما يدعم التصميمات صديقة البيئة، واستخدام مواد منخفضة التكلفة. أيضاً يوفر العمل إطاراً لفهم تأثير الإجهادات المختلفة على الهياكل، مما يمهّد الطريق لتصميمات أكثر كفاءة وموثوقية ويقلل من مخاطر الفشل الهيكلي وبما أن البحث يساهم في تطوير روبوتات فعالة، بالتالي يدفع بالضرورة للتقدم التكنولوجي ويفتح أسواقاً جديدة في الروبوتات الصناعية.

3- طرائق البحث ومواده:

اتّبع البحث المنهجية التحليلية التجريبية، واعتمد على المحاكاة العددية لتحسين التصميم لهيكل الروبوت رباعي الأرجل باستخدام برنامج SolidWorks لتحليل العناصر المحدودة (FEM) وتم إدراج مادة PLA في البرنامج لإتمام الاختبارات والمحاكاة عليها للحصول على نتائج مقاربة مع الواقع. تم اعتبار أن المقاطع المدروسة فردية (لا يوجد أي مشاركة في أي حالة وصل مدروسة إلا لقضيب واحد بمقطع ثابت على طوله) والقضبان المدروسة والمستخدم في تصميم هيكل الجذع ذات مقاطع دائرية، مربعة أو مستطيلة فقط. انطلاقاً من الفرضية، تصميم الهيكل سيتم باستخدام قضبان ذات مقاطع دائرية، مربعة أو مستطيلة سيتجه العمل أولاً إلى إيجاد خصائص ومميزات كل منها وطريقة تفاعلها تحت إجهادات مختلفة مثل الشد والضغط والانحناء والالتواء.

4- النتائج والمناقشة:

تأثير كثافة شبكة العناصر المحدودة (Mesh Density) وعدد العقد على دقة تحليلات الإجهادات: أحد أهم الركائز في الهندسة بمساعدة الحاسوب (CAE) بهدف دراسة كيفية تغير قيم الإجهادات المحسوبة عند تقليل حجم العناصر وزيادة عدد العقد، وهو ما يعرف باختبار تقارب الشبكة عند استخدام طريقة العناصر المحدودة (FEM)، يتم تقسيم الجسم المصمت إلى عناصر صغيرة تلتقي عند نقاط تسمى العقد (Nodes) زيادة العقد ترفع من دقة المعادلات الرياضية التي تصف توزيع الإجهادات والتشوهات. ولكن الإفراط في زيادة العقد يؤدي إلى هدر

هائل في الوقت وموارد الحاسوب دون تغيير ملموس في الدقة. لذلك تم إجراء دراسة لتحديد عدد العقد المثالي الذي سوف يعطي ادق قيم دون الافراط في استهلاك زمن حسابي وذلك باستخدام برنامج SOLID WORKS وبما اننا نعلم ان الاجهادات تتركز في الحواف غالباً سنفترض وجود عينة اختبار لوح معدني من مادة الفولاذ (ASTM A36) نظراً لخصائصها الخطية في النطاق المرن (إجهاد الخضوع 250Mpa) ذو شكل مستطيل بطول (160 ملم) وعرض (40 ملم) وسماكة (4 ملم) يحتوي على ثقب في المنتصف بقطر (10 ملم) خاضع لقوة شد بقيمة (12KN) لأنه يجب عدم تخطي إجهاد الخضوع للبقاء في المنطقة المرنة وجود الثقب يسبب تركيزاً للإجهادات (Stress Concentration) حول حوافه. حيث تعد هذه المنطقة اختباراً لكفاءة الشبكة.

جدول 1. نتائج مقارنة زيادة عدد العقد في الشبكة المدروسة

رقم المحاكاة	عدد العقد المرغوب في الشبكة	عدد العقد في المحاكاة	الاجهاد الاعظمي σ_{max}	معدل التغير (%)
1	1500	1590	$2.007 \times 10^{+8}$	-
2	5000	4957	$2.120 \times 10^{+8}$	5.46%
3	18000	18267	$2.382 \times 10^{+8}$	10.9%
4	55000	55802	$2.400 \times 10^{+8}$	0.7%
5	150000	148390	$2.440 \times 10^{+8}$	1.6%

نلاحظ معدل التغير في المحاكاة 3 هو الأعلى وهو قيمة وسطية لا تستهلك موارد الحاسوب بشكل كبير بالتالي حقق توازن بين الدقة المقبولة هندسياً والوقت المستغرق تصبح بعدها الزيادة في عدد العقد غير مجدية وتؤدي فقط إلى زيادة في وقت المعالجة.



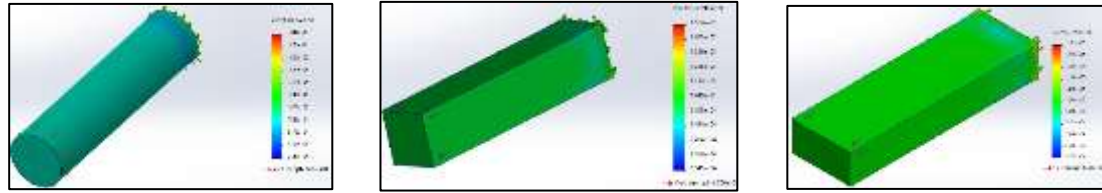
الشكل 1. محاكاة العينة المختبرة لشبكة بعدد عقد اصغري (a) وشبكة بعدد عقد اعظمي (b) تحت اجهاد شد حيث تظهر (c) توزع الاجهادات عند اجراء المحاكاة

تحديد شكل المقطع العرضي المرغوب:

تمت المقارنة بين ثلاثة قضبان بأطوال موحدة وبمقطع عرضي ثابت على طول القضيب المقاطع المدروسة للقضبان هي كما تم ذكرها سابقاً مقاطع دائرية، مربعة أو مستطيلة والإجهادات المطبقة عليها عند المقارنة هي إجهادات الشد والضغط والانحناء والالتواء.

1.4. إجهاد الشد:

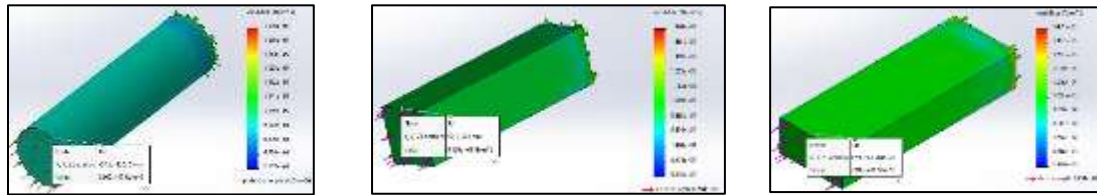
تم إخضاع القضبان بالمقاطع الثلاثة المدروسة لإجهاد شد بحيث تم تثبيت طرف الجائز بوتافة وتعريض كل منها لقوة شد وتوحيد قيمة القوة المسببة للإجهاد على القضبان الأربعة (3.924N) وباستخدام أداة تحليل الإجهادات في برنامج Solidworks وبعدد عقد (Nodes) 18000 عقدة تم محاكاة هذا الاختبار والحصول على النتائج التالية كما هو موضح في الشكل 1:



الشكل 1. تأثير إجهاد الشد على ثلاثة قضبان بمقطع دائري ومربع ومستطيل.

4.2 إجهاد الضغط:

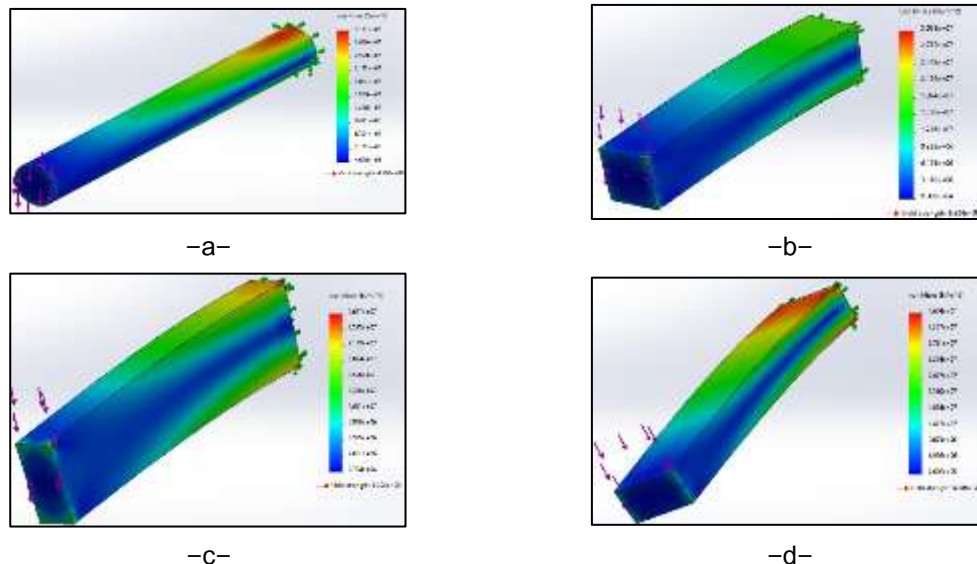
تم دراسة القضبان بمقاطعها الثلاثة عند إجهاد الضغط بطريقة مشابهة لإجهاد الشد وباستخدام برنامج Solidworks وعند إجراء المحاكاة تم الحصول على النتائج التالية كما هو موضح في الشكل 2:



الشكل 2. تأثير إجهاد الضغط على ثلاثة قضبان بمقطع دائري ومربع ومستطيل.

4.3 إجهاد الانحناء:

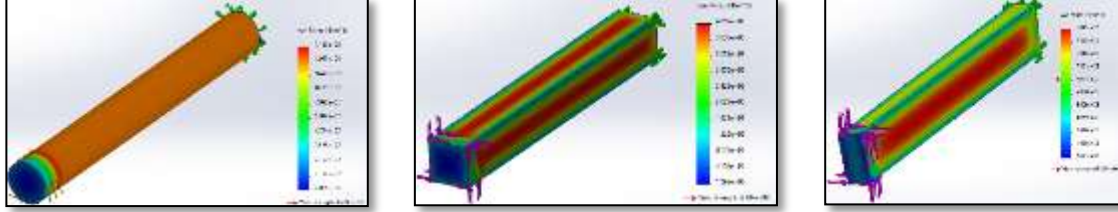
تم إجراء اختبار إجهاد الانحناء على القضبان السابقة بتطبيق قوة شاقولية على الطرف الحر للقضيب وتم الحصول على النتائج التالية كما هو موضح في شكل 3 مع ملاحظة أن المقطع المستطيل تم دراسته على إجهاد الانحناء بتموضعين، (c) تموضع 1، (d) تموضع 2.



الشكل 3. تأثير إجهاد الانحناء على ثلاثة قضبان بمقطع دائري (شكل a) ومربع (شكل b) ومستطيل بتموضعين: تموضع 1 (شكل c) وتموضع 2 (شكل d).

4.4 إجهاد الفتل أو الالتواء:

تم اختبار القضبان بالمقاطع الثلاثة على إجهاد التواء بتطبيق عزم فتل على الطرف الحر للقضيب وظهرت النتائج كما هو موضح في الشكل 4 والجدول 1.



الشكل 4. تأثير إجهاد الالتواء على ثلاثة قضبان بمقطع دائري ومربع ومستطيل.

يبين الجدول التالي نتائج المقارنة بين أشكال المقاطع العرضية للقضبان الثلاثة عند اخضاعها لإجهادات الشد والضغط والفتل:

الجدول 1. نتائج المقارنة بين أشكال المقاطع العرضية للقضبان الثلاثة عند اخضاعها لإجهادات الشد والضغط والفتل

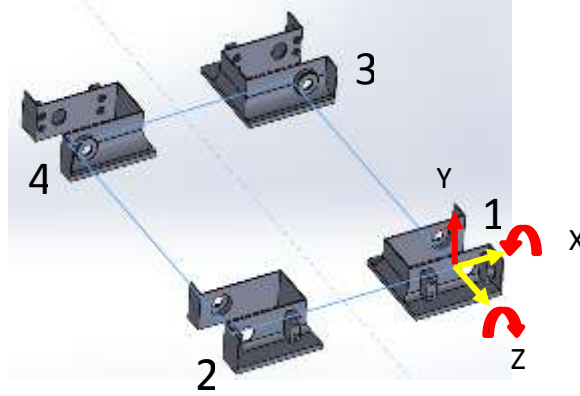
نوع الاجهاد	مقطع دائري	مقطع مستطيل	مقطع مربع
إجهاد شد N/m^2	$1 \times e^{+5}$	$9.99 \times e^{+4}$	$9.99 \times e^{+4}$
إجهاد ضغط N/m^2	$1 \times e^{+5}$	$9.99 \times e^{+4}$	$9.99 \times e^{+4}$
إجهاد انحناء N/m^2	$3.33 \times e^{+7}$	تموضع 1	تموضع 2
		$2.64 \times e^{+7}$	$4.69 \times e^{+7}$
إجهاد فتل N/m^2	$1.180 \times e^{+8}$	$1.013 \times e^{+9}$	$4.038 \times e^{+8}$
التدلي عند اجهاد الانحناء m	$2.36 \times e^{-3}$	$5.06 \times e^{-3}$	$1.41 \times e^{-3}$

خلاصة:

يبيدي المقطع الدائري نتائج أفضل من حيث توزيع إجهادات الفتل أما بالنسبة للجائز ذو المقطع المستطيل يبيدي أفضل توزيع لإجهادات الانحناء شرط توضع بالتموضع الأول الموضح في الشكل 3- c أما لإجهادات الشد والضغط فالجائز ذو المقطع المربع أو المستطيل يبيديان تأثيراً متقارباً عند هذا النوع من الإجهادات.

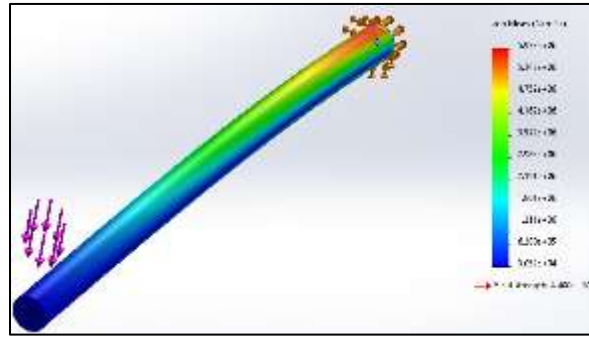
ثانياً: تحليل القوى التي قد يخضع لها الجسم ستاتيكيًا:

يبين الشكل 5 أربع وحدات وصل مرقمة متوضعة بالزوايا الأربعة لجسم الروبوت واعتبار وحدة الوصل الأولى حرة الحركة. تخضع الوصلة الحرة بشكل ستاتيكي إلى قوة ثقل القدم ذات كتلة (400غ) المرتبطة بها أثناء فترة التآرجح في الهواء حيث تكون منطبقة على محور Y أما بالنسبة لمحوري X و Z فيخضعان لعزوم فتل حول كل منهما. تتفاعل الوحدة الأولى المرتبطة بشكل مباشر مع الوحدة 3 و 2 بحيث تقوم بالتسبب بظهور إجهاد إنحناء على الوحدة 3 ناتج عن القوة على محور Y أو العزم حول محور X وظهور عزم فتل ناتج عن عزم على محور Z .



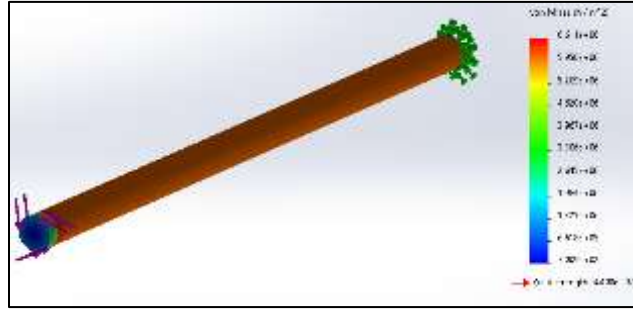
الشكل 5. وحدات الوصل المكونة لجسم الروبوت والقوى التي يتعرض لها ستاتيكيًا.

بما أنه في القسم الأول بالدراسة تم استنتاج أفضلية استخدام المقطع الدائري على توزيع إجهادات الفتل، سنقوم باستخدام المقطع الدائري للوصل بين الوحدتين 1 و 3 والوحدتين 1 و 4، واختبار تحمل هذا القضيب للانحناء بافتراض وجود ثلاث معاملات أمان (1.5 و 2 و 3) لتجنب الوصول لحد الفشل للمادة PLA نظراً لكونها أكثر اللدائن الحرارية شيوعاً واستخداماً في تقنية النمذجة بالترسيب المنصهر (FDM) على الرغم من أنها مادة ضعيفة نسبياً تحت الإجهادات المتكررة بالإضافة لتدني استقرارها الحراري؛ إذ تبدأ خواصها بالانهيار عند درجات حرارة تتجاوز (60°C) على عكس مادة ABS التي تتميز باستقرار حراري ممتد يصل إلى (100°C) على الرغم من انخفاض حد الخضوع الستاتيكي لها $(30-40 \text{ Mpa})$. نصف القطر للقضيب المدروس عند معامل أمان 1.5 هو 4.9 ملم، وعند معامل أمان 2 هو 5.45 ملم وعند معامل أمان 3 هو 6.13 ملم.



الشكل 6. قضيب بمقطع دائري ونصف قطر 5.45 ملم عند معامل أمان 2 لإجهاد انحناء الحالة الستاتيكية.

وقع الاختيار على القضيب الموضح بالشكل 6 فهو يبدي توازناً بين تحمل إجهاد الانحناء وكمية المادة المستخدمة في تصنيع الجذع حيث نتج عن هذا الاختبار إجهاد انحناء بمقدار 5.9 Mpa نسبة إلى إجهاد حد الخضوع للمادة 44 Mpa وسنختبر هذا القضيب بالخواص المذكورة على عزم فتل أعظمي في حالة الروبوت المدروس ونتج عن هذا العزم إجهاد فتل أعظمي 6.6 Mpa متوزع بشكل متساوي على طول القضيب كما هو موضح في الشكل 7.

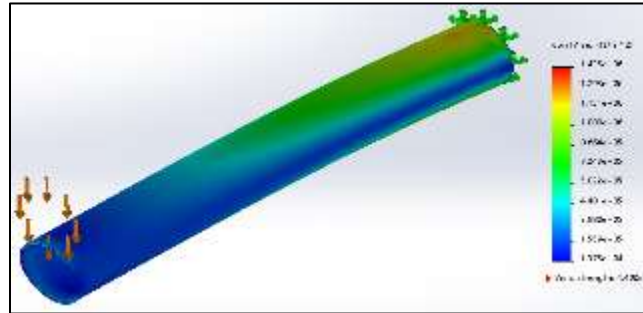


الشكل 7. تعرض القضيب ذو المقطع الدائري بنصف قطر 5.45 ملم والمدرّوس عند معامل أمان 2 لإجهاد فشل الحالة الستاتيكية.

بتثبيت حجم المادة واستخدام مبدأ Hollow core beam [19] نستطيع الحصول على تصميم أفضل يحقق توزيع أفضل للإجهادات وذلك باستبدال القضيب مصمت الشكل بآخر أنبوبي الشكل مع الحفاظ على نفس القدر من المادة المستخدمة في القضيب المصمت باستخدام العلاقة:

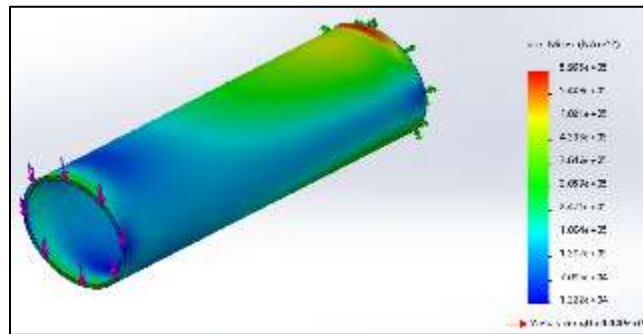
$$r_{solid}^2 = R_{out}^2 - r_{in}^2$$

حيث R_{out} هو نصف القطر الخارجي للأنبوب r_{in} هو نصف القطر الداخلي للأنبوب المرغوب و r_{solid} هو نصف قطر القضيب المصمت. تم اختيار القطر الخارجي $R_{out}=14$ mm نظراً لكونه يحقق اتصال أفضل مع وحدات الوصل وبإخضاع الأنبوب لاختبار الانحناء ظهرت قيمة إجهاد انحناء أعظمي 1.43 Mpa كما هو موضح في الشكل 8.



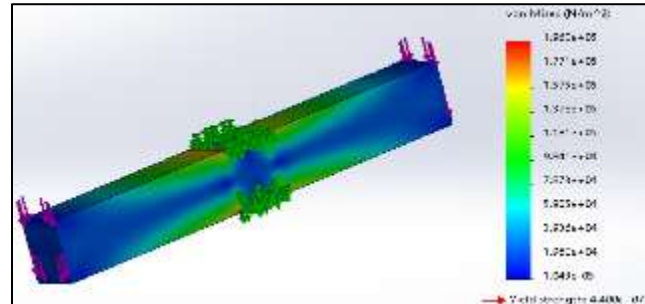
الشكل 8. تحميل القضيب لنفس إجهاد الانحناء بعد إعادة تشكيله بتثبيت حجم المادة.

بشكل مشابه تمت دراسة الوصلة بين وحدتي الوصل 1 و 2 كما هو موضح في الشكل 9 حيث أظهرت إجهاد انحناء أعظمي 0.59 Mpa.



الشكل 9. دراسة القضيب الواصل بين الوحدة 1 و 2.

يفتقر التصميم الى هيكل وسطي على شكل حرف X يصل بين الوحدات 3 و2، 1 و4 بغرض زيادة التدعيم وربط الأحمال على الجسم وبما أن الأحمال متموضعة على المنتصف تؤدي لإجهاد انحناء بالتالي أفضل مقطع مستخدم هو المقطع المستطيل بالتموضع الأول وتم اعتبار معامل أمان 1.5 بالتالي أبعاد مقطع المستطيل المدروس هي 3 X 1.5 سم وتمت الدراسة بتثبيت القضيب بالمنتصف وتعرضه لأحمال هي وزن رجل الروبوت من كل جهة ونتج عن هذا التحميل إجهاد انحناء أعظمي 0.19 Mpa كما هو موضح في الشكل 10.

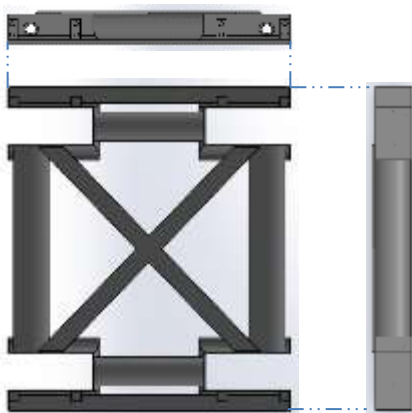


الشكل 10. دراسة القضيب الواصل بين الوحدة 1 و4.

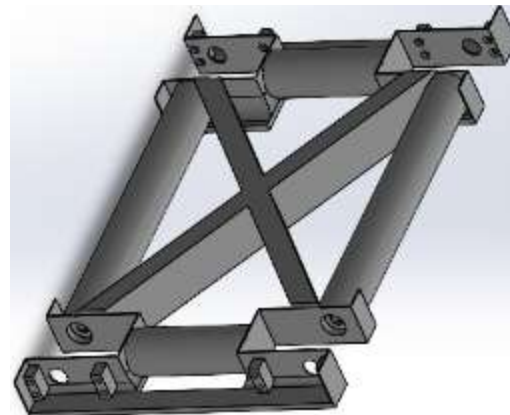
جدول 3. قيم الاجهادات لنفس الدراسة والحالات السابقة ولكن باستبدال المادة PLA بمادة ABS

المقطع مستطيل الشكل	الأنبوب ذو المقطع الدائري		القضيب ذو المقطع الدائري المصمت		ABS
	اجهاد انحناء (Mpa)		اجهاد فتل (Mpa)	اجهاد انحناء (Mpa)	
اجهاد انحناء (Mpa)	الانبوب الواصل بين وحدتي الوصل 1 و2	الانبوب الواصل بين وحدتي الوصل 2 و3			
0.19	1.24	0.59	6.06	5.93	

حسب الجدول السابق نلاحظ أن الإجهاد المتوقع لمادة ABS هو نفسه تقريبا إجهاد مادة PLA .
يوضح الشكل 11 والشكل 12 جذع الروبوت بعد ربط جميع الأجزاء.

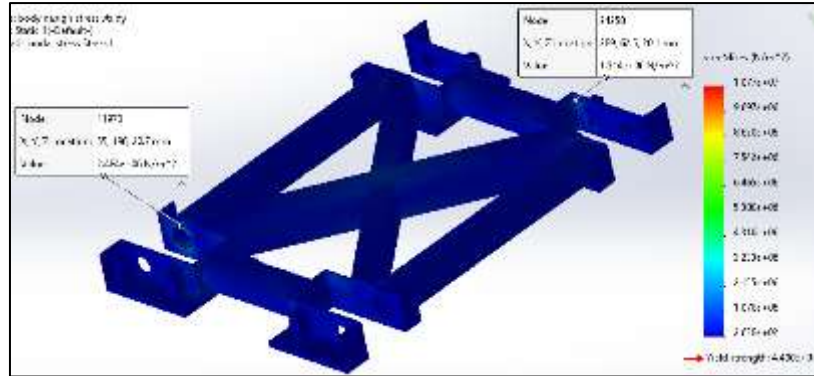


الشكل 12. مساقط جذع الروبوت Torso.



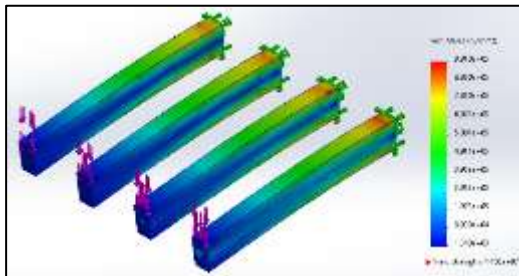
الشكل 11. جذع الروبوت Torso.

يوضح الشكل 13 توزيع الإجهادات الستاتيكي على الجسم في حالة رفع رجلي الروبوت المتقابلتين قطرياً معاً عن الأرض بحيث يبقى الروبوت مستنداً على الأرض بالرجلين الآخرين مما يشكل نقاط تثبيت ويظهر إجهاد أعظمي بقيمة 2.4 Mpa.

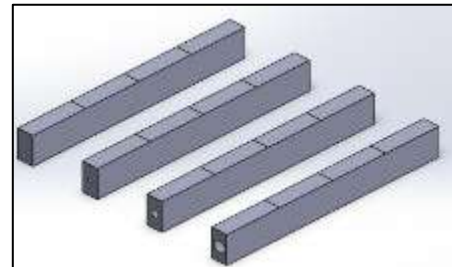


الشكل 13. توزيع الاجهادات على جذع الروبوت المقترح والمصنع من مادة PLA في حالة رفع الارجل 1 و4.

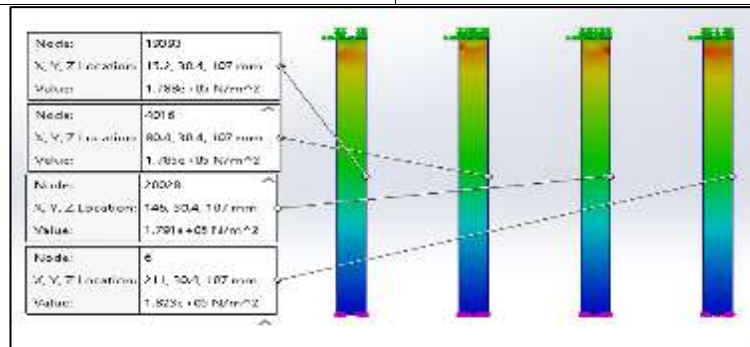
اختبار إمكانية تقليل وزن الروبوت باستخدام Hollow core beam effect وذلك بدراسة إضافة تفريغ في مركز كل من الوصلتين المشكلتين لتصلب منتصف جذع جسم الروبوت وعلى طول الوصلة. الدراسة أجريت على أربع جوائز بمقطع مستطيل يحمل نفس أبعاد الجائز المستخدم في الوصلة المتصلبة بحيث الجائز الأول لا يحوي أي تفريغ، الثاني يحوي تفريغ بشكل أسطواني في مركز الوصلة على طول الجائز حيث قيمة قطر الدائرة هي ربع عرض المقطع المستطيل للجائز، بنفس الشكل تم تزويد الجائز الثالث والرابع ولكن قطر الدائرة نصف وثلاث أرباع عرض المقطع المستطيل للجائز على التوالي كما هو موضح في الشكل 14 والشكل 15 والشكل 16.



الشكل 15. اختبار الجائز المفرغ تحت إجهاد الانحناء.

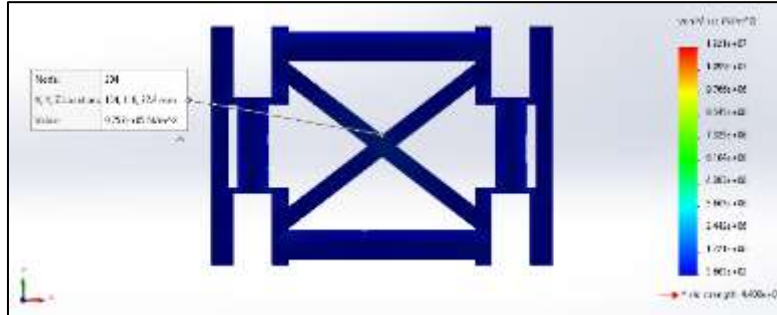


الشكل 14. الجائز في الوصلة المتصلبة بحالة تفريغ.

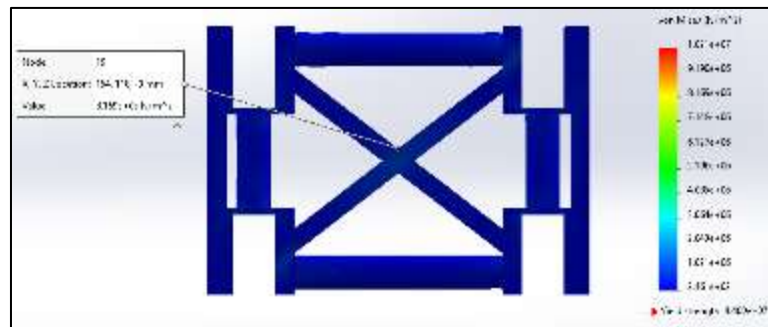


الشكل 16. الإجهادات في نقطة ثابتة من الجوائز الاربعة.

تم اختبار الجذع بدون إضافة تفريغ ومع إضافة تفريغ أنبوبي الشكل في الوصلة المتصلية تحت حمل 400 غرام متوضع في منتصف الجسم كما هو موضح في الشكل 17 وتم قراءة الإجهادات عند نقطة معينة (Node284) حيث كانت القراءة قبل إضافة التفريغ 0.9757 Mpa وأصبحت بعد إضافة التفريغ 0.8169 Mpa مما يوضح توزيع الإجهادات الحاصل بعد إضافة التفريغ.



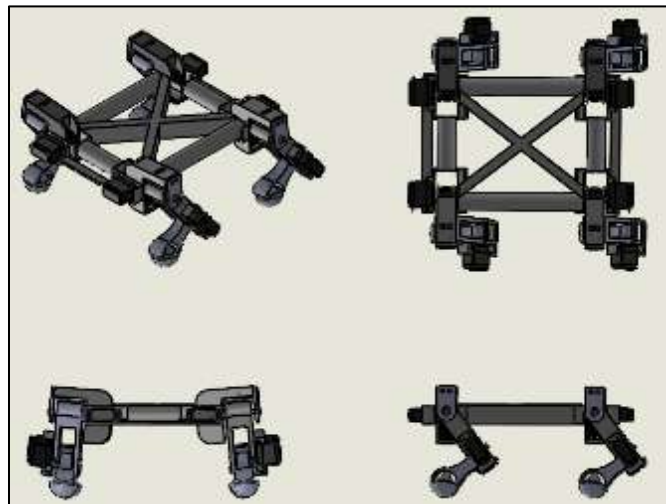
- a -



- b -

الشكل 17. تحميل الجذع بحمل 400 غرام بدون إضافة أنبوب (a) ومع إضافة أنبوب (b) في الوصلة المتصلية لتصميم جذع الروبوت.

يوضح الشكل 18 مساقط جذع الروبوت الذي تم تصميمه موصولاً إلى الأطراف الأربعة.



الشكل 18. المساقط الأربعة للروبوت رباعي الأرجل المدروس.

5-الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

يمكن القول أنّ تحليل الإجهادات على مقاطع القضبان المختلفة (الدائرية، المربعة، والمستطيلة) أظهر تفوق المقاطع الدائرية في مقاومة إجهادات الشد والقتل، بينما برزت المقاطع المستطيلة (في التوضع الأول) كأفضل خيار لإجهادات الانحناء، مع توزيع مشابه لإجهادات الضغط بين المقاطع المربعة والمستطيلة. كما أدى تطبيق مبدأ التجويف (Hollow core beam effect) إلى تحسين توزيع الإجهادات مع المحافظة على حجم المادة، مما ساهم في زيادة الصلابة الهيكلية لجذع الروبوت دون الحاجة لإضافة مادة، خاصة عند استخدام مادة PLA المناسبة للطباعة ثلاثية الأبعاد يوضح ذلك في ورقة [20] التي تقدم مقارنة هندسية لعينات الـ PLA لمعرفة مدى تحملها لأحمال الشد المباشرة مقارنة بأحمال الانحناء و تغير قدرة العينة على مقاومة الالتواء أو الانحناء لأسفل بناءً على سماكة وطريقة رص الطبقات. وفي ورقة [21] تقدم المعايير العملية مثل معيار (ASTM D790) لقياس صلابة الانحناء ومقاومة الكسر لعينات الـ PLA توضح ورقة [22] اختباراً عملياً لطرق انهيار مادة الـ PLA تحت تأثير قوى الضغط العمودية وكيفية تشوه الهيكل وتقدم ورقة [23] دراسة لقياس مدى تحمل عينات الـ PLA لإجهادات القتل والالتواء بناءً على إعدادات التصنيع. تم التحقق من التصميم النهائي لجذع الروبوت، المدعوم بدعامات متصالبة، تحت حمولة 400 غرام، حيث أظهر أداءً مستقرًا ومقاومًا للتشوه الستاتيكي، مما يعزز الكفاءة بالطاقة المستهلكة والقدرة على حمل الأحمال. هذه النتائج توفر أساساً لتطوير روبوتات رباعية الأرجل منخفضة التكلفة.

التوصيات:

من المستحسن إجراء تجارب عملية حقيقية للتحقق من نتائج المحاكاة، بالإضافة إلى استكشاف مواد بديلة أقوى مثل ألياف الكربون لتحسين المتانة تحت الإجهادات الديناميكية. كذلك، يُفضل توسيع الدراسة لتشمل تحليل الإجهادات الديناميكية، مع التركيز على تحسين التصميم باستخدام خوارزميات الذكاء الصناعي لتحقيق توازن أفضل بين الوزن والقوة الهيكلية.

References:

- [1] K. J. Waldron, V. J. Vohnout, A. Pery, and R. B. McGhee, "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 37–48, 1984, doi: 10.1177/027836498400300204.
- [2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: System overview and integration," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2478–2483, 2002, doi: 10.1109/IRDS.2002.1041641.
- [3] K. Berns, J. Christian Albiez, and H. Witte, "BISAM: From small mammals to a four legged Walking Machine." [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/236847624>

- [4] D. Wojtkowiak, K. Talaśka, I. Malujda, J. Górecki, and D. Wilczyński, "Modelling and static stability analyses of the hexa-quad bimorph walking robot," *MATEC Web of Conferences*, vol. 254, p. 02029, 2019, doi: 10.1051/matecconf/201925402029.
- [5] X. Meng, S. Wang, Z. Cao, and L. Zhang, "A review of quadruped robots and environment perception," *Chinese Control Conference, CCC*, vol. 2016-August, pp. 6350–6356, Aug. 2016, doi: 10.1109/CHICC.2016.7554355.
- [6] M. E, H. Liu, X. Zhang, C. Fu, and H. Ma, "Compliant gait generation for a quadruped bionic robot walking on rough terrains," *Jiqiren/Robot*, vol. 36, no. 5, pp. 584–591, Sep. 2014, doi: 10.13973/j.cnki.robot.2014.0584.
- [7] J. Kim, T. Kang, D. Song, and S. J. Yi, "Design and control of a open-source, low cost, 3d printed dynamic quadruped robot," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/app11093762.
- [8] Y. Li, B. Li, J. Ruan, and X. Rong, "Research of mammal bionic quadruped robots: A review," in *IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM - Proceedings*, 2011, pp. 166–171. doi: 10.1109/RAMECH.2011.6070476.
- [9] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 10822–10825, Jan. 2008, doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833.
- [10] H. Khan *et al.*, "Development of the lightweight hydraulic quadruped robot - MiniHyQ," *IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications, TePRA*, vol. 2015-August, Aug. 2015, doi: 10.1109/TEPRA.2015.7219671.
- [11] H. W. Park, P. M. Wensing, and S. Kim, "High-speed bounding with the MIT Cheetah 2: Control design and experiments," *International Journal of Robotics Research*, vol. 36, no. 2, pp. 167–192, Feb. 2017, doi: 10.1177/0278364917694244.
- [12] J. R. Hooks *et al.*, "ALPHRED: A Multi-Modal Operations Quadruped Robot for Package Delivery Applications", doi: 10.13140/RG.2.2.11599.84649.
- [13] V. Megaro, "Computational Design Tools for Personalized Robotic Creatures and Animatronics," 2017, doi: 10.3929/ETHZ-B-000247123.
- [14] A. Ghiorghe, "OPTIMIZATION DESIGN FOR THE STRUCTURE OF AN RRR TYPE INDUSTRIAL ROBOT," *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, vol. 72, no. 4, 2010.
- [15] K. Walia, A. Khan, P. Breedon, and P. Polymer-Based Additive, "polymers Polymer-Based Additive Manufacturing: Process Optimisation for Low-Cost Industrial Robotics Manufacture," 2021, doi: 10.3390/polym.

- [16] R. N. M. Delda, R. B. Basuel, R. P. Hacla, D. W. C. Martinez, J. J. Cabibihan, and J. R. C. Dizon, "3D Printing Polymeric Materials for Robots with Embedded Systems," Dec. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/technologies9040082.
- [17] M. Z. H. Bhuiyan, K. Khanafer, E. I. Rafi, and M. S. Shihab, "Non-Linear Hyperelastic Model Analysis and Numerical Validation of 3D Printed PLA+ Material Incorporating Various Infill Densities," *Machines*, vol. 13, no. 2, p. 91, Jan. 2025, doi: 10.3390/machines13020091.
- [18] M. Majeed, R. Silva, D. Nd. Faye, and P. Pedrosa, "Influence of Strain-Offset-Based Yield Definitions on the Accuracy of Finite Element Analysis of 3D-Printed PLA with Different Raster Orientations," *Polymers (Basel)*, vol. 18, no. 2, p. 158, Jan. 2026, doi: 10.3390/polym18020158.
- [19] M. A. Ismael and Y. M. Hameed, "Structural behavior of hollow-core reinforced self-compacting concrete beams," *SN Appl. Sci.*, vol. 4, no. 5, pp. 1–11, May 2022, doi: 10.1007/S42452-022-05036-6/TABLES/9.
- [20] P. C. Katiyar, B. P. Singh, M. Chhabra, and D. Parle, "Effect of Build Orientation on Load Capacity of 3D Printed Parts," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, vol. 10, no. 6, pp. 38–52, Mar. 2022, doi: 10.35940/ijrte.F6821.0310622.
- [21] B. Blake, R. Mendenhall, and B. Eslami, "Balancing Strength and Flexibility: Mechanical Characterization of Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites in FDM 3D Printing," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 9, p. 288, Aug. 2025, doi: 10.3390/jmmp9090288.
- [22] G. Ye, H. Bi, and Y. Hu, "Compression behaviors of 3D printed pyramidal lattice truss composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 233, p. 111706, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111706.
- [23] N. Ng and K. Flowers, "Torsional Strength in Fused Filament Fabrication 3D Printing," *Journal of Student Research*, vol. 9, no. 2, Nov. 2020, doi: 10.47611/jsrhs.v9i2.1204.